

AUS DEM LEHRSTUHL
FÜR ZAHNERHALTUNG UND PARODONTOLOGIE
PROF. DR. WOLFGANG BUCHALLA
DER FAKULTÄT FÜR MEDIZIN
DER UNIVERSITÄT REGENSBURG

PENETRATION DEPTH OF IRRIGANTS INTO ROOT DENTINE AFTER SONIC,
ULTRASONIC AND PHOTOACOUSTIC ACTIVATION

Inaugural – Dissertation
zur Erlangung des Doktorgrades
der Zahnmedizin

der
Fakultät für Medizin
der Universität Regensburg

vorgelegt von
Verena Grubmüller

2019

AUS DEM LEHRSTUHL
FÜR ZAHNERHALTUNG UND PARODONTOLOGIE
PROF. DR. WOLFGANG BUCHALLA
DER FAKULTÄT FÜR MEDIZIN
DER UNIVERSITÄT REGENSBURG

PENETRATION DEPTH OF IRRIGANTS INTO ROOT DENTINE AFTER SONIC,
ULTRASONIC AND PHOTOACOUSTIC ACTIVATION

Inaugural – Dissertation
zur Erlangung des Doktorgrades
der Zahnmedizin

der
Fakultät für Medizin
der Universität Regensburg

vorgelegt von
Verena Grubmüller

2019

Dekan:

Prof. Dr. Dirk Hellwig

1. Berichterstatterin:

Prof. Dr. Kerstin Galler, Ph.D.

2. Berichterstatterin:

PD Dr. Stephanie Krifka

Tag der mündlichen Prüfung:

18.12.2019

Vorwort

Diese Arbeit basiert auf dem Paper mit dem Titel „Penetration depth of irrigants into root dentine after sonic, ultrasonic and photoacoustic activation“. Es erschien am 28.03.2019 im International Endodontic Journal bei John Wiley & Sons. Das Thema wurde mir von Frau Prof. Dr. Kerstin Galler (Lehrstuhl für Zahnerhaltung und Parodontologie, Universitätsklinik Regensburg) überlassen und entstand in Zusammenarbeit mit Herrn Dr. Ralf Schlichting (Privatpraxis, Passau).

Die Endodontie stellt ein wichtiges Fachgebiet innerhalb der Zahnheilkunde dar. Durch Wurzelkanalbehandlungen kann Patienten der Wunsch erfüllt werden, trotz tiefer kariöser Läsionen oder Traumata die eigenen Zähne zu erhalten. Die Anatomie von Zahnwurzeln und die Komplexität des darin liegenden Kanalsystems, das im Zuge dieser Behandlung gereinigt, desinfiziert und dicht obturiert werden soll, haben innerhalb es Zahnmedizinstudiums früh mein Interesse geweckt.

Um die Prognose von Wurzelkanalbehandlungen weiterhin zu verbessern und betroffene Zähne möglichst dauerhaft beschwerdefrei zu halten, ist dieses Gebiet stets Inhalt verschiedenster Forschungsansätze. Eine Säule der Behandlung stellt die chemische Reinigung und Desinfektion des Wurzelkanals durch Spülflüssigkeiten dar. Um die Benetzung einer möglichst großen Fläche des Kanalsystems zu erreichen und damit möglichst viele Bakterien zu eliminieren sowie Gewebsreste der Pulpa aufzulösen, wurden verschiedene Aktivierungsmethoden entwickelt.

Die Überprüfung neuer Verfahren im Vergleich zu herkömmlichen Aktivierungssystemen, um den Erfolg der Wurzelkanalbehandlung und damit den Erhalt eigener Zähne zu gewährleisten, hat mich zu dieser Arbeit motiviert. Durch die Entfernung möglichst vieler Bakterien kann Entzündungs- und somit Schmerzfreiheit für den Patienten erreicht, sowie der Verlust betroffener Zähne und in der Folge die Notwendigkeit von prothetischem Zahnersatz und Implantaten verhindert werden. Das übergeordnete Ziel dieser Arbeit war es, die Erfolgsaussichten endodontischer Therapiemaßnahmen zu optimieren.

Inhaltsverzeichnis

| | |
|---------------------------------|----|
| 1 Einführung | 4 |
| 2 Zusammenfassung | 6 |
| 2.1 Material und Methoden | 6 |
| 2.2 Ergebnisse..... | 8 |
| 2.3 Diskussion | 9 |
| 2.4 Fazit | 12 |
| 3 Publikation..... | 13 |
| 4 Ausblick..... | 22 |
| 5 Literatur | 24 |
| 6 Danksagung | 27 |

1 Einführung

Pulpitis, Pulpanekrose und daraus folgende periapikale Läsionen werden durch die Infektion der Zahnpulpa und des Wurzelkanals mit oralen kommensalen Bakterien ausgelöst. Das primäre Ziel der Wurzelkanalbehandlung ist daher die Reinigung und Desinfektion des Wurzelkanalsystems und die Reduktion von Mikroorganismen. Durch alleinige mechanische Präparation mit endodontischen Instrumenten bleibt mehr als ein Drittel der Kanaloberfläche unbehandelt (1, 2), was unzureichendes Debridement zur Folge hat. Die Instrumentierung der Kanalwände führt zudem zur Bildung einer Schmierschicht und der Ansammlung von Dentindebris auf den Kanalwänden. Deshalb spielt die Spülung des Wurzelkanals bei der endodontischen Behandlung eine entscheidende Rolle, da sie es ermöglicht, verbliebene Pulpareste chemisch zu lösen sowie die Schmierschicht und Debris zu entfernen (3).

Das apikale Drittel des Wurzelkanalsystems hat typischerweise eine komplexe Morphologie (4) und ist daher besonders schwer zu reinigen (5). Herkömmliche Spülverfahren mittels Spritze und Kanüle führen zudem nur zu einer begrenzten Penetration der Spülflüssigkeiten über den Hauptkanal hinaus in die Dentintubuli (6). Um diesen Problemen entgegen zu wirken und die Effizienz der Spüllösungen zu erhöhen, wurden verschiedene Aktivierungsmethoden entwickelt.

Bei der passiven Ultraschallspülung (PUI = passive ultrasonic irrigation) wird eine oszillierende Feile verwendet, die im präparierten Kanal („after shaping“) zu akustischen Strömungsphänomenen führt (>25 kHz). Die Verwirbelung der Spülflüssigkeiten ermöglicht deren Eindringen in nicht instrumentierte Bereiche und erhöht die Scherkräfte entlang der Kanalwände, wodurch Gewebsreste und Biofilm besser gelöst werden können (7, 8). Schallbetriebene Geräte haben eine ähnliche Wirkungsweise. Hier wird meist ein flexibler Aufsatz verwendet und bei niedrigeren Frequenzen gearbeitet (<20 kHz). Schallaktivierung zeigte in Studien bessere Ergebnisse als alleinige Spülung mittels Kanüle (8–10). Aktivierung mittels Ultraschall ist der Schallaktivierung wiederum hinsichtlich der Eindringtiefe der Spülflüssigkeiten auf Arbeitslänge und in die Seitenkanälchen überlegen (9).

Neuerdings haben laseraktivierte Spülverfahren steigendes Interesse in der Endodontologie erregt. Hierbei werden Spülflüssigkeiten durch Laser im mittleren Infrarotbereich (2780 und 2940 nm) aktiviert. Die vom Laser emittierte Strahlung wird in wasserbasierten Lösungen

stark absorbiert. Der Effekt laserbasierter Aktivierung wird durch Kavitation erreicht. Dabei werden an der Glasfaserspitze des Lasers Dampfblasen gebildet, die zunächst expandieren und anschließend kollabieren. Diese Volumenveränderung führt zu einer deutlichen Bewegung der Flüssigkeit. Nachfolgende Laserimpulse führen zur Bildung weiterer Blasen, aus deren Kollaps wiederum Kavitationseffekte resultieren. Dadurch entstehen akustische Strömungsphänomene, welche im gesamten Kanalsystem auftreten (11, 12).

Aktivierung von Spülflüssigkeiten mittels Laser kann zum Beispiel mit Hilfe des PIPS (photoninduced photoacoustic streaming) durchgeführt werden, das mit einem gepulsten Er:YAG Laser arbeitet (13). Dabei wird niedrig pulsierende Energie (10 bzw. 20 mJ) mit einer kurzen Impulslänge (50 μm) eingesetzt, wodurch es zu hohen Energiespitzen und Kavitationseffekten kommt (14). Die laserbasierte Aktivierung von Spülflüssigkeiten wird als effektiver beschrieben, verglichen mit Spülverfahren mittels Kanüle, aber auch gegenüber Ultraschallaktivierung in Bezug auf die Entfernung von Schmierschicht und Debris (15–17). Eine weitere Studie (14), die sich mit der Entfernung von hartem Gewebedebris in mesialen Wurzeln von Unterkiefermolaren beschäftigte, konnte zeigen, dass es zwar Unterschiede gab zwischen der Effektivität von Laser- und Ultraschallaktivierung, allerdings waren diese Unterschiede nicht signifikant. Eine der neuesten Entwicklungen bezüglich laserbasierter Aktivierung von endodontischen Spüllösungen ist das SWEEPS (shock wave enhanced emission photoacoustic streaming), das ebenfalls mit einem Er:YAG Laser arbeitet und bei dem eine Glasfaserspitze in der Pulpakammer des Zahnes platziert wird. Der Unterschied zum PIPS besteht in der Pulsung des Laserlichts. Der SWEEPS Modus verwendet besonders getaktete Impulse, um eine Serie von Blasen zu generieren. Dabei führen sekundäre Blasen zum Kollabieren der primär gebildeten Blasen. Die daraus resultierenden Schockwellen induzieren vermehrte akustische Strömungsphänomene. Vor der Publikation, die Thema dieses Aufsatzes ist, wurden keine Daten unabhängiger Recherche zur SWEEPS-Aktivierung veröffentlicht.

Das Ziel dieser Studie war, zu beurteilen, ob neuere Methoden zur Aktivierung endodontischer Spülflüssigkeiten wirkungsvoller sind als die herkömmlich angewandten Techniken. Hierfür wurden verschiedene Aktivierungstechniken einschließlich Ultraschall, Schall, PIPS und SWEEPS hinsichtlich ihrer Fähigkeit untersucht, in Dentintubuli einzudringen.

2 Zusammenfassung

2.1 Material und Methoden

Um die Eindringtiefe endodontischer Spüllösungen in die Dentintubuli durch verschiedene Aktivierungsmethoden darstellen und vergleichen zu können, wurden Versuche an humanen extrahierten Zähnen durchgeführt. Es wurden neunzig einwurzelige Zähne mit geradlinigem Kanalverlauf und rundem Wurzelquerschnitt ausgewählt. Die Zähne waren aus kieferorthopädischen Gründen extrahiert worden (Altersspanne 14-20 Jahre). Sie wurden in 0,5 % Chloramin T Trihydrat (Carl Roth, Karlsruhe, Deutschland) gelagert und vierundzwanzig Stunden vor der Versuchsdurchführung in Reinstwasser (Barnstead Smart 2 Pure, Thermo Fisher Scientific, Waltham, MA, USA) überführt.

Mit einem Diamantbohrer (Endo Access Bur, Dentsply Sirona, Ballaigues, Switzerland) wurden Zugangskavitäten präpariert. Der Kanaleingang wurde mit ISO 10, 0.06 Taper C-Pilotfeilen aufgesucht und mit Gates-Glidden-Bohrern (Dentsply Sirona) der Größe 2 und 3 erweitert. Der Kanaleingang wurde mit einem Schaumstoffpellet bedeckt und die Wände der Zugangskavität mit einem Dentinadhäsiv (Scotchbond Universal, 3 M ESPE, Seefeld, Deutschland) gemäß Herstellerangaben behandelt. Anschließend wurden die Zugangskavitäten mit einem Bulkfill-Komposit (SDR flow+, Dentsply Sirona) gefüllt.

Um standardisierte koronale Zugangskavitäten mit 6 mm Höhe anzulegen, welche für laserbasierte Aktivierungsmethoden notwendig sind, wurde mit einem konischen Diamantbohrer (FG/Typ palatinal, Henry Schein Dental, Langen, Deutschland) eine koronale Bohrung durchgeführt. Im Rahmen der Wurzelkanalaufbereitung wurde ein Gleitpfad mit Handfeilen der Größe ISO 08, 0.02 Taper bis ISO 20, 0.02 Taper (K-Feilen, VDW, München, Deutschland) präpariert. Die Arbeitslänge wurde als Patency-Länge minus 1 mm definiert. Der apikale Bereich jeder Wurzel wurde mit einer Schicht zähfließendem, elastomerem Präzisionsabformmaterial (Panasil tray Soft Heavy, Kettenbach, Eschenbach, Deutschland) bedeckt, um apikale Extrusion von Spülflüssigkeiten zu vermeiden (18). Anschließend wurden die Wurzelkanäle gemäß der Crown-Down-Methode mit rotierenden Feilen (Protaper Next X1-X4 und X-Smart Plus Motor, Dentsply Sirona) auf ISO 40, 0.06 Taper erweitert.

Zwischen jeder Feile wurden die Kanäle mit 5 % Natriumhypochlorit (NaOCl, SPEIKO, Münster, Deutschland), das auf 60 °C erwärmt worden war, mit einem Volumen von 1 ml gespült. NaOCl wurde mit Papierspitzen abgenommen und die Zähne wurden bis zur Abschlusspülung in Reinstwasser aufbewahrt. Die Abschlusspülung wurde mit NaOCl (5 %, 60 °C), Reinstwasser (Raumtemperatur) und EDTA (17 %, Raumtemperatur) durchgeführt. Das Spülprotokoll für die Abschlusspülung wurde wie folgt etabliert:

1. NaOCl (5 ml, 1 min)
2. Reinstwasser (5 ml, 1 min)
3. EDTA (5 ml, 1 min), Aktivierung für 30 s
4. Reinstwasser (5 ml, 1 min)
5. NaOCl (5 ml, 1 min), Aktivierung für 30 s, Ruhephase für 30 s, Aktivierung für 30 s

Nach einer Spülung mit Reinstwasser wurde der Kanal mit 1 % Methylenblau (Sigma-Aldrich, Steinheim, Deutschland) aufgefüllt und dieses wurde mit der Aktivierungsmethode der jeweiligen Testgruppe für 30 s aktiviert, um mit Hilfe des Farbstoffes die Penetrationstiefe der letzten Spüllösung zu visualisieren. Anschließend wurde der Kanal mit Papierspitzen getrocknet und die Zähne wurden bis zur weiteren Bearbeitung trocken gelagert.

Die Zähne waren randomisiert auf die fünf Testgruppen (I-V) und eine Kontrollgruppe (0) verteilt worden. Die Aktivierung wurde wie folgt durchgeführt:

- (I) Manuelle, dynamische Aktivierung (MDA): Kanülenspülung mit manueller Auf- und Abbewegung der Kanüle im Kanal (NaviTip 30 ga, Ultradent, Köln, Deutschland)
- (II) Passive Ultrasonic Irrigation: IRRI K 25/25 (VDW GmbH, München, Deutschland) und das zugehörige Ultraschallgerät (VDW.ULTRA, VDW) bei 25 % Intensität
- (III) EDDY (Schallaktivierung): EDDY (Polyamide tip, VDW)
- (IV) PIPS (Photoninduced Photoacoustic Streaming): 20 mJ, 15 Hz, 0.30 W, SSP Mode, Luft/Wasser aus (FOTONA, Ljubljana, Slowenien)
- (V) SWEEPS (Shock Wave Enhanced Emission Photoacoustic Streaming): 20 mJ, 15 Hz, 0.30 W, SWEEPS Modus, Luft/Wasser aus (FOTONA)
- (0) Kontrollgruppe: Abschlusspülung nur mit 5 % NaOCl ohne Aktivierung

Mit einer Innenlochsäge (Leitz 1600, Ernst Leitz Wetzlar, Wetzlar, Deutschland) wurden die Zähne unter konstanter Wasserkühlung bei 600 rpm und einer Vorschubgeschwindigkeit von 0.5 mm s^{-1} in $300 \text{ }\mu\text{m}$ dicke horizontale Scheiben geschnitten. Die Schnitte wurden fortlaufend nummeriert und einzeln aufbewahrt, unterteilt in koronale, mittlere und apikale Wurzeldrittel.

Pro Drittel wurden zwei nicht aufeinanderfolgende Scheiben ausgewählt und unter einem Lichtmikroskop mit korrespondierendem Kamerasystem und entsprechender Software (Zeiss AXIO LAB A1 und ZEN core v2.0.66.1000, Jena, Deutschland) fotografiert. Die Aufnahmen wurden in die Fiji Software geladen (19) und es wurde ein virtuelles Ziffernblatt mit 24 gleichmäßig angeordneten Segmentlinien auf jeder Fotografie platziert. Entlang der 24 Linien wurde die Eindringtiefe des Farbstoffes visuell ermittelt. Um Fehler während der Analyse der Penetrationstiefen zu vermeiden, waren zwei Untersucher an dieser Aufgabe beteiligt. Dabei legte einer der Untersucher den Start- und Endpunkt entlang den Segmentlinien fest, wobei der zweite Untersucher die korrekte Ausführung überprüfte. Die eigentliche Messung der Segmentlinien basierte auf der Software.

Aus den 24 Messungen wurde der Median der Penetrationstiefe pro Scheibe berechnet. Pro Gruppe wurden 15 Zähne präpariert, was am Ende insgesamt 540 Schnitte ergab. Die Eindringtiefe des Farbstoffes in die Dentintubuli wurde stellvertretend für das Eindringen von NaOCl beim letzten Aktivierungsschritt gemessen. Mediane Penetrationstiefen sowie 25-75 % Quantilen wurden berechnet und sowohl für den ganzen Kanal als auch für das koronale, mittlere und apikale Drittel ermittelt. Außerdem wurden die minimal erreichten Penetrationstiefen pro Scheibe berechnet, wobei auch hier Mediane sowie Quantilen bestimmt wurden.

2.2 Ergebnisse

Es konnte gezeigt werden, dass die Eindringtiefe des Farbstoffes in die Dentintubuli bei der Kontrollgruppe am niedrigsten war. Die mittleren Eindringtiefen lagen für die Gruppen I-V bei $700\text{-}900 \text{ }\mu\text{m}$. Die Eindringtiefen im apikalen Drittel waren signifikant niedriger als im koronalen Drittel. Die minimalen Eindringtiefen im apikalen Drittel waren für PIPS signifikant höher ($P \leq 0.046$).

Ultraschall-, Schall- und Laserbasierte Aktivierung von endodontischen Spülflüssigkeiten führten im apikalen Wurzeldrittel zu größeren Penetrationstiefen als einfache manuell-dynamische Aktivierung mittels Kanülenspülung und sind ihr somit überlegen. Der neue SWEEPS-Modus konnte jedoch die Eindringtiefe der Spüllösungen nicht weiter erhöhen.

2.3 Diskussion

Verglichen mit der Kontrollgruppe, bei der nicht mit EDTA gespült und keine Aktivierungsmethode angewandt wurde, waren die Penetrationstiefen bei den Gruppen I-V höher. Dies könnte der Fähigkeit von EDTA zugeschrieben werden, die Schmierschicht auf der Kanaloberfläche zu entfernen (20). Die geringere, aber dennoch messbare Eindringtiefe der Spüllösungen bei der Kontrollgruppe könnte durch die weitlumige Präparation des Kanals in Kombination mit der gründlichen Spülung mit Natriumhypochlorit erklärt werden. Es scheint, als würde die Schmierschicht das Eindringen der Flüssigkeiten in die Dentintubuli zwar reduzieren, jedoch nicht vollständig verhindern. Des Weiteren stammten die Spenderzähne ausschließlich von jungen Patienten und waren aus kieferorthopädischen Gründen extrahiert worden. Die Zähne wiesen somit weder sklerotisches Dentin noch andere physiologische oder pathologische Veränderungen auf, weshalb die Penetration der Tubuli in dieser Hinsicht nicht behindert wurde.

Zwischen den Gruppen I-V waren in den koronalen und mittleren Kanaldritteln nur geringe Unterschiede feststellbar. Mit manueller, dynamischer Kanülenspülung konnten in diesen Bereichen ähnliche Resultate erreicht werden wie mit Schall-, Ultraschall- und Laseraktivierung. In den apikalen Wurzeldritteln wurden allerdings Unterschiede offensichtlich. In diesen Wurzelkanalabschnitten kommen vermehrt Ramifikationen und Seitenkanälchen vor (4). Deshalb ist die Reinigung und Desinfektion in diesem Bereich besonders wichtig und ausschlaggebend für den Erfolg einer endodontischen Behandlung. Die Penetrationstiefe im apikalen Drittel war nach manueller, dynamischer Kanülenspülung ähnlich gering wie bei der Kontrollgruppe. Bei den mit PIPS, Schall und Ultraschall behandelten Gruppen war die Eindringtiefe dagegen auffallend höher. Die Aktivierung von Spülflüssigkeiten scheint daher vor allem im apikalen Wurzelbereich von Vorteil zu sein. Hier wird der Transport der Spüllösungen in die Dentintubuli durch anatomische Gegebenheiten erschwert, wie die geringere Zahl an Dentintubuli, die zudem einen kleineren Durchmesser aufweisen, sowie durch sklerotisches Dentin (21). Zudem ist das apikale

Drittel mit Feilen oder Sonden schwerer erreichbar. In dieser Hinsicht scheint PIPS von Vorteil zu sein, da die Glasfaserspitze hier lediglich in die Pulpenkammer eingeführt und der Laser auf den Kanaleingang ausgerichtet werden muss. Die anderen getesteten Methoden sind dagegen in ihrer Wirkweise von der Insertionstiefe des Aufsatzes in den Wurzelkanal abhängig. Dieser Vorteil des PIPS könnte sich darin zeigen, dass die minimalen Eindringtiefen im apikalen Wurzeldrittel signifikant höher waren als bei den anderen Gruppen.

In histologischen Studien konnte gezeigt werden, dass die mediane Eindringtiefe von Bakterien in Dentintubuli bei 390 μm liegt (22). Die mittleren Eindringtiefen der Spülflüssigkeiten von 700-900 μm , die mit den Gruppen I-V erreicht wurden, könnten durch ihren antibakteriellen Effekt von klinischer Relevanz sein. Die erhöhte Penetrationstiefe im apikalen Bereich nach Aktivierung könnte auch darin begründet liegen, dass die apikale Luftblase, welche das Eindringen von Spülflüssigkeiten auf Arbeitslänge oft behindert, durch die angewendeten Verfahren reduziert bzw. ganz entfernt wurde. Diese apikalen Lufteinschlüsse können durch Schall- und Ultraschallaktivierung besser gelöst werden als durch manuelle, dynamische Kanülenspülung (23).

Die Einführung des neuen SWEEPS-Modus führte nicht zu einer Verbesserung der Laseraktivierung. SWEEPS konnte keine höheren Penetrationstiefen erzielen als die anderen getesteten Aktivierungsmethoden und brachte im apikalen Bereich schlechtere Ergebnisse hinsichtlich minimal erreichbarer Werte im Vergleich zu seinem Vorgänger PIPS. Man kann Spekulationen darüber anstellen, dass die veränderte Pulsung und das Generieren von sekundären Blasen beim SWEEPS aufgrund der geometrischen Gegebenheiten im Wurzelkanal Gegenströmungen verursachen könnten, welche den Fluss eher behindern. Es scheint auch, als wäre der neue SWEEPS-Modus auf den Markt gebracht worden, ohne dass er zuvor ausreichend getestet und mit dem Vorgänger verglichen worden war. Da es zum SWEEPS bisher keine Daten in der Literatur gibt, kann kein Bezug auf andere Studien genommen werden.

Ein Teil der in dieser Studie ermittelten Ergebnisse wurde durch das Studiendesign beeinflusst. Die für die Versuche ausgewählten Zähne waren einwurzelig mit relativ rundem Kanaldurchmesser und einfacher Kanalgeometrie. Der Vorteil dieser Auswahlkriterien war die Vergleichbarkeit und Reproduzierbarkeit der Penetration von Spülflüssigkeiten durch ähnliche Wurzelkanalanatomien. Unterschiede der Wirkweise zwischen den verschiedenen

Gruppen würden in komplexeren Wurzelkanalsystemen vermutlich deutlicher. Die Aufbereitung der Wurzelkanäle auf Größe 40 mit einer Konizität von 0.06 kann als mittlere bis weite Präparation gesehen werden (24). Diese Aufbereitungsgröße wurde ausgewählt, um das Eindringen der Spülflüssigkeiten möglichst tief in den Wurzelkanal und die Benetzung der gesamten Kanaloberfläche zu erreichen, wodurch die Penetration in die Dentintubuli bei den verschiedenen Gruppen vergleichbar werden sollte. Das verwendete Spülprotokoll war durch die Verwendung von EDTA (17 %) und erwärmtem Natriumhypochlorit (5 %) sehr gründlich. Natriumhypochlorit ist in dieser Konzentration als auch durch Erwärmung erwiesenermaßen effektiver hinsichtlich seiner desinfizierenden und gewebsauflösenden Wirkung (25). Es wird empfohlen, im Rahmen der Abschlussspülung den Chelator EDTA zu verwenden, der die Fähigkeit hat, Calcium zu binden und somit die Schmierschicht zu entfernen, wodurch Natriumhypochlorit im nächsten Spülschritt effektiver in die Dentintubuli eindringen kann (26, 27). Diese Faktoren haben vermutlich zu den hohen Penetrationstiefen in den koronalen und mittleren Abschnitten der verschiedenen Gruppen beigetragen.

In anderen Studien wurde Methylenblau bereits als indirekter Indikator zur Darstellung der Penetrationstiefe von Spülflüssigkeiten verwendet. Es gibt zahlreiche Studiendesigns für diesen Versuchstyp, bei denen fluoreszenzmarkierte Spüllösungen (28) oder Sealer (29–31) in Kombination mit konfokaler Mikroskopie zum Einsatz kamen. Sowohl mit Methylenblau als auch mit fluoreszierenden Flüssigkeiten wurden zunächst Pilotexperimente durchgeführt. Wegen der starken Eigenfluoreszenz von Dentin war die Grenze der Eindringtiefe von fluoreszenzmarkierten Flüssigkeiten jedoch nicht identifizierbar, weshalb man die Versuche mit dem Farbstoff Methylenblau fortsetzte. Die Penetrationstiefen von Methylenblau, die in dieser Studie beobachtet werden konnten, stimmen mit Eindringtiefen anderer Studien überein. Vergleichbare Versuche mit Sealerpenetration nach Spülung zeigten ähnliche Penetrationstiefen und höhere Sealerpenetration in größerem Abstand vom Apex (28–31).

2.4 Fazit

Die Studie konnte zeigen, dass ein sorgfältiges Spülprotokoll in geraden, weitleumigen Kanälen mit einfacher Kanalgeometrie eine hohe Penetrationstiefe der Spülflüssigkeiten in koronalen und mittleren Abschnitten erreicht, im apikalen Drittel jedoch Einschränkungen aufweist. Die Aktivierung von Spülflüssigkeiten erhöhte die apikale Eindringtiefe, wo vor allem PIPS zu tieferer Penetration führte, gefolgt von EDDY (Schall) und PUI (Ultraschall). Die neue SWEEPS-Methode konnte dagegen selbst gegenüber manueller dynamischer Aktivierung mittels Kanüle keine Verbesserung zeigen.

3 Publikation

Der folgende Artikel mit dem Titel „Penetration depth of irrigants into root dentine after sonic, ultrasonic and photoacoustic activation“ erschien am 28.03.2019 in der 25. Ausgabe des International Endodontic Journal auf den Seiten 1210-1217 bei John Wiley & Sons.

Penetration depth of irrigants into root dentine after sonic, ultrasonic and photoacoustic activation

K. M. Galler^{1,†}, V. Grubmüller^{1,†}, R. Schlichting², M. Widbiller¹ , A. Eidt¹, C. Schuller¹, M. Wölflick¹, K.-A. Hiller¹  & W. Buchalla¹

¹Department of Conservative Dentistry and Periodontology, University Hospital Regensburg, Regensburg; and ²Private Practice, Passau, Germany

Abstract

Galler KM, Grubmüller V, Schlichting R, Widbiller M, Eidt A, Schuller C, Wölflick M, Hiller K-A, Buchalla W. Penetration depth of irrigants into root dentine after sonic, ultrasonic and photoacoustic activation. *International Endodontic Journal*.

Aim To compare penetration depths of endodontic irrigants into the dentinal tubules of extracted teeth when using several activation methods.

Methodology The root canals of 90 extracted human teeth were prepared to size 40, .06 taper. The straight and round-shaped root canals were distributed randomly into six groups, and final irrigation was performed with EDTA and sodium hypochlorite as follows: (I) manual dynamic activation, (II) Ultrasonic, (III) Sonic, (IV) PIPS (photon-induced photoacoustic streaming), (V) SWEEPS (shock-wave enhanced emission photoacoustic streaming) and (0) control without final irrigation or activation. Subsequently, methylene blue was inserted into the canals and activated according to the groups (I–V). Teeth were

sectioned horizontally, imaged under a light microscope, and dye penetration depths were measured in six sections per tooth and 24 points on a virtual clock-face per section. Data were analysed statistically by nonparametric tests for whole teeth and separately for coronal, middle and apical thirds.

Results Penetration of dye into the dentinal tubules was lowest for the controls. Median penetration depths amounted to 700–900 µm for groups I–V with differences in the apical thirds between group I and the other test groups. Minimum penetration depths were significantly greater for PIPS in the apical thirds ($P \leq 0.046$).

Conclusions Greater penetration depths occurred in the apical thirds for ultrasonic, sonic and laser-induced activation compared to manual dynamic activation. PIPS was associated with deeper penetration of irrigants. The novel SWEEPS mode did not increase irrigant penetration.

Keywords: disinfection, EDTA, laser, root canal, sodium hypochlorite, ultrasonic.

Received 1 August 2018; accepted 28 February 2019

Correspondence: Kerstin M. Galler, Department of Conservative Dentistry and Periodontology, University Hospital Regensburg, Franz-Josef-Strauß Allee 11, 93053 Regensburg, Germany (Tel.: +49941 9446024; fax: +49941 9446025; e-mail: kerstin.galler@ukr.de).

[†]Authors contributed equally to this work.

Introduction

Pulpitis, pulpal necrosis and subsequent periradicular lesions are induced by opportunistic infections of the dental pulp and root canals with oral commensal microorganisms. Thus, the primary goal of root canal treatment is cleaning and disinfection of the canal system and reduction of microorganisms. With mechanical preparation alone, more than one-third of the canal surface may remain untouched by

endodontic instruments (Peters *et al.* 2001, Paqué *et al.* 2010) resulting in insufficient debridement. Furthermore, instrumentation of canal walls creates a smear layer and the accumulation of dentine debris in surface irregularities. Irrigation plays a crucial role during treatment, as it enables chemical dissolution of remnant pulp tissue, removal of debris and smear layer and mechanical detachment of the biofilm (Zehnder 2006). The apical third of the canal system typically has a complex morphology (Vertucci 1984) and is therefore particularly difficult to clean (Foschi *et al.* 2004).

Traditional irrigation during root canal treatment with a syringe and needle is associated with only limited penetration beyond the main canal into dentinal tubules (Ram 1977). In order to increase the efficacy of irrigants, general activation techniques have been developed. Passive ultrasonic irrigation (PUI) uses an oscillating file in the canal after shaping to induce acoustic microstreaming (>25 kHz). Its rapid movement enables penetration into noninstrumented areas and enhances shear stress on tissue remnants and biofilm (Jiang *et al.* 2011, Bryce *et al.* 2018). Sonic devices work similarly, but generally use flexible tips and operate at lower frequencies (<20 kHz). Sonic activation appears to be more effective than needle irrigation alone (de Gregorio *et al.* 2010, Rödig *et al.* 2010, Bryce *et al.* 2018); however, ultrasonic activation has been reported to be superior regarding penetration to working length and into lateral canals (de Gregorio *et al.* 2010). More recently, laser-activated irrigation based on the activation of irrigants by medium-infrared lasers (2780 and 2940 nm) has gained increasing attention in endodontics. The radiation emitted by the laser is strongly absorbed by water-based solutions. The effect of laser activation is achieved by cavitation where vapour bubbles are formed at the fibre tip, which expand and then collapse. These changes in size lead to a distinct fluid movement. The consecutive collapse of the bubbles generates localized shock waves and lead to a distinct fluid movement. Furthermore, subsequent laser pulses induce secondary cavitation bubbles, which result in acoustic streaming of the solution throughout the entire canal system (Blanken *et al.* 2009, Matsumoto *et al.* 2011).

An example of laser-induced activation is PIPS (photon-induced photoacoustic streaming), performed by a pulsed Er:YAG laser (Divito *et al.* 2012). It uses low pulse energies (10 or 20 mJ) with a short pulse length (50 µs), resulting in high peak powers and

efficient cavitation (Verstraeten *et al.* 2017). Laser-activated irrigation has been reported to be more effective than syringe-based irrigation but also more effective than ultrasonic activation regarding the removal of smear layer and debris (De Moor *et al.* 2010, Guidotti *et al.* 2014, Deleu *et al.* 2015). However, a recent study (Verstraeten *et al.* 2017) reported that differences regarding hard tissue debris removal in the mesial roots of mandibular molars between laser and ultrasonic activation of irrigants were evident but not significant. The latest development regarding laser-activated irrigation in endodontics is SWEEPS (shock-wave enhanced emission photoacoustic streaming), which uses an Er:Yag laser and a fibre tip that is placed inside the pulp chamber, the difference, however, is the pulse of the laser light. The SWEEPS mode uses pulses to create a series of bubbles, which are timed to appear such that secondary bubbles lead to a collapse of existing bubbles, resulting in shock waves and enhanced photoacoustic streaming. Up to now, data from independent research on SWEEPS activation have not been published.

The overarching aim of this study was to assess whether newly developed methods of activation are more effective than commonly used techniques. The objective was to compare several methods of activation for endodontic irrigants including ultrasonic, sonic, PIPS and SWEEPS in their ability to penetrate into dentinal tubules.

Materials and methods

Preparation of teeth

Ninety single-rooted human teeth extracted for orthodontic reasons (age range 14–20 years) with straight and round-shaped root canals were selected and stored in 0.5% chloramine T-hydrate (Carl Roth, Karlsruhe, Germany). Twenty-four hours prior to experimentation, the teeth were transferred to ultra-pure water (Barnstead Smart2Pure, Thermo Fisher Scientific, Waltham, MA, USA). Access cavities were prepared with a diamond bur (Endo Access Bur, Dentsply Sirona, Ballaigues, Switzerland), the canal orifice was localized by scouting with a size 10, .06 taper C-pilot file and enlarged with Nos. 2 and 3 Gates-Glidden burs (Dentsply Sirona). The entrance was covered with a foam pellet, and the walls of the access cavity were treated with dentine bonding agent (Scotchbond Universal, 3M ESPE, Seefeld, Germany) according to

the manufacturer's instructions. Access cavities were filled with bulk fill composite resin (SDR flow+, Dentsply Sirona) and extended coronally in order to create a reservoir of 6 mm in height, necessary for the laser-based activation methods. To ensure standardized access cavities, a new cone-shaped access cavity was then prepared with a diamond bur (FG/type palatal, Henry Schein Dental, Langen, Germany).

For root canal preparation, a glide path was prepared with hand files size 08, .02 taper to size 20, .02 taper (K-files, VDW, Munich, Germany). Working length was determined as patency length minus 1 mm. The apical region of each root was covered with a layer of heavy-body condensation silicone impression material (Panasil tray Soft Heavy, Kettenbach, Eschenburg, Germany) to avoid extrusion of irrigating solutions (Widbiller *et al.* 2017). Root canals were instrumented in a crown-down manner with rotary files (Protaper Next X1–X4 and X-Smart Plus Motor, Dentsply Sirona) to size 40, .06 taper. Canals were irrigated with 5% sodium hypochlorite (NaOCl, SPEIKO, Münster, Germany), pre-heated to 60 °C, with a volume of 1 mL between files. NaOCl was removed with paper points, and teeth were stored in ultrapure water before final irrigation. The irrigation solutions for final irrigation were NaOCl (5%, 60 °C), ultrapure water (room temperature) and EDTA (17%, room temperature). The protocol for final irrigation was established as follows:

1. NaOCl (5 mL, 1 min)
2. Ultrapure water (5 mL, 1 min)
3. EDTA (5 mL, 1 min), activation for 30 s
4. Ultrapure water (5 mL, 1 min)
5. NaOCl (5 mL, 1 min), activation for 30 s, resting phase 30 s, activation for 30 s

After a rinse with ultrapure water, the canal was filled with 1% methylene blue (Sigma-Aldrich, Steinheim, Germany), which was activated for 30 s with the respective activation method as defined by the test group in order to visualize the penetration depth of the last irrigant. Subsequently, the canal was dried with paper points and teeth were stored dry until further use. Teeth were randomly divided into five test groups (I–V) and one control group (0), where activation was performed as follows:

- (I) Manual Dynamic Activation (MDA): needle irrigation with manual up- and down-movement of the needle inside the canal (NaviTip 30 ga, Ultradent, Köln, Germany)
- (II) Passive Ultrasonic Irrigation: IRRI K 25/25 (VDW GmbH, Munich, Germany and the appendant

ultrasonic device (VDW.ULTRA, VDW) at 25% intensity

- (III) EDDY (Sonic Activation): EDDY (Polyamide tip, VDW)
- (IV) PIPS (Photon-Induced Photoacoustic Streaming): 20 mJ, 15 Hz, 0.30 W, SSP Mode, air/water turned off (FOTONA, Ljubljana, Slovenia)
- (V) SWEEPS (Shock-Wave Enhanced Emission Photoacoustic Streaming) 20 mJ, 15 Hz, 0.30 W, SWEEPS Mode, air/water turned off (FOTONA)
- (0) Control: Final irrigation only with 1 mL of 5% NaOCl without activation

Sectioning and light microscopy

Cross sections of the teeth were prepared using a circular saw (Leitz 1600, Ernst Leitz Wetzlar, Wetzlar, Germany) under constant water flow at 600 rpm with a feed speed of 0.5 mm s⁻¹ at a thickness of 300 µm. Sections were numbered consecutively and collected selectively from the coronal, middle and apical third of the root. Two nonconsecutive sections per third were chosen and placed under a light microscope with a corresponding camera system and software (Zeiss AXIO LAB A1 and ZEN core v2.0.66.1000, Jena, Germany). Images were taken, uploaded into Fiji software (Schindelin *et al.* 2012), and a virtual clock face was placed over each image. Along 24 exactly spaced lines of the clock face, the penetration depth of methylene blue dye was determined visually by two examiners, and the median penetration depth was calculated. Figure 1 shows representative images after staining and sectioning. Fifteen teeth were prepared in each group resulting in a total of 540 sections.

Penetration depths of methylene blue into the dentinal tubules were a surrogate measure for the penetration of sodium hypochlorite during the last step of activation. Median penetration depths as well as 25–75% quantiles were calculated and depicted for the entire canal and separately for coronal, middle and apical regions. Additionally, the minimally achievable penetration depths were calculated. The minimum penetration depth was determined in each section, and median values as well as quantiles of these values from all sections were calculated.

Data analysis

Medians and 25–75% quantiles were calculated for whole canals per group as well as for the coronal,

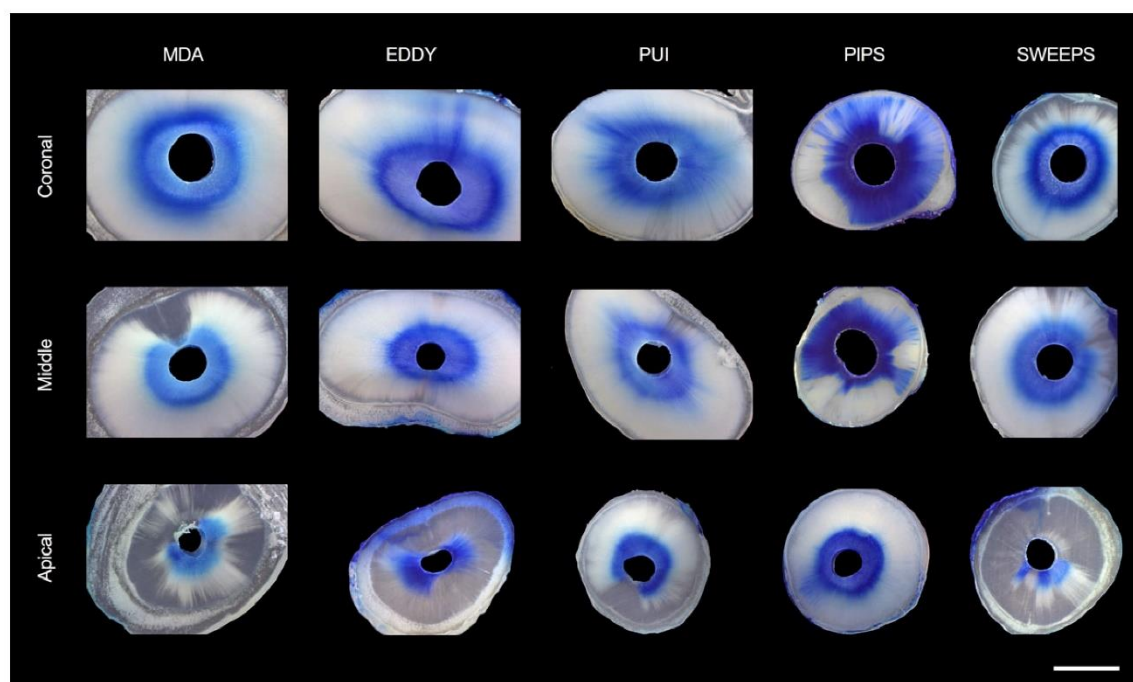


Figure 1 Representative images of methylene blue penetration into root canal dentine after different activation methods in coronal, middle and apical sections. Scale bar: 1000 μm .

medial and apical tooth segments per group. Data were analysed statistically by nonparametric tests (Mann–Whitney *U*) on an $\alpha = 0.05$ level of significance (SPSS, version 23.0, SPSS Inc., Chicago, IL, USA).

Results

For controls without final irrigation, the median penetration depth of dye as a surrogate for sodium hypochlorite for all teeth was 445.8 μm which was significantly lower compared to all other groups. The median penetration depths for whole canals (Fig. 2a) from highest to lowest were EDDY (985.5 μm) > PIPS (961.5 μm) > PUI (823.8 μm) > MDA (775.0 μm) > SWEEPS (722.0 μm), with significantly lower penetration depths for SWEEPS compared to PIPS ($P = 0.026$). The minimally achievable penetration depth (Fig. 2b) was greatest for PIPS (526.5 μm) with significant differences compared to EDDY (310.5 μm , $P = 0.013$), MDA (336.0 μm , $P = 0.016$) and SWEEPS (365.0 μm , $P = 0.026$).

The separate evaluation of median penetration depths in the coronal, middle and apical regions (Fig. 3a) revealed a decline in irrigant penetration

depth from coronal to apical. In coronal and middle sections, the various activation methods achieved similar results; however, differences became apparent apically. The greatest median penetration depths were observed for PIPS coronally and apically (1246.8 and 657.5 μm , respectively) and for EDDY in the middle sections (985.5 μm). PIPS was associated with significantly deeper penetration in the apical sections compared to needle irrigation (260.3 μm , $P = 0.006$), and also to SWEEPS (332.1 μm , $P = 0.02$). Considering the minimally achievable penetration depths, PIPS achieved the greatest penetration depths in the middle and particularly in the apical sections (364.0 μm vs. 32.0–102.0 μm for other groups) with significant differences compared to all other groups ($P \leq 0.046$).

Discussion

This laboratory study aimed to compare penetration depths of final irrigation solutions into the dentinal tubules of extracted human teeth after application of various modes of activation. Compared to controls with neither EDTA nor activation, the test groups were associated with deeper penetration of irrigants, which can be expected due to the ability of EDTA to

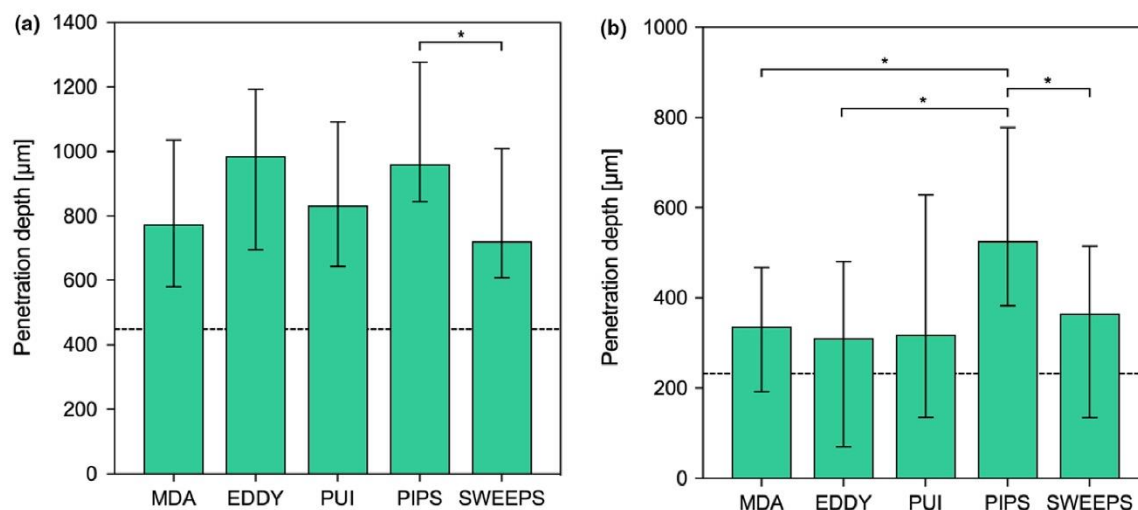


Figure 2 (a) Median penetration depths with 25–75% quantiles for the tested activation methods ($n = 15$). (b) Minimally achievable penetration depths with 25–75% quantiles. The dotted line indicates the median (a) and minimal (b) penetration depth for controls. Asterisks indicate significant differences ($P \leq 0.05$) between groups.

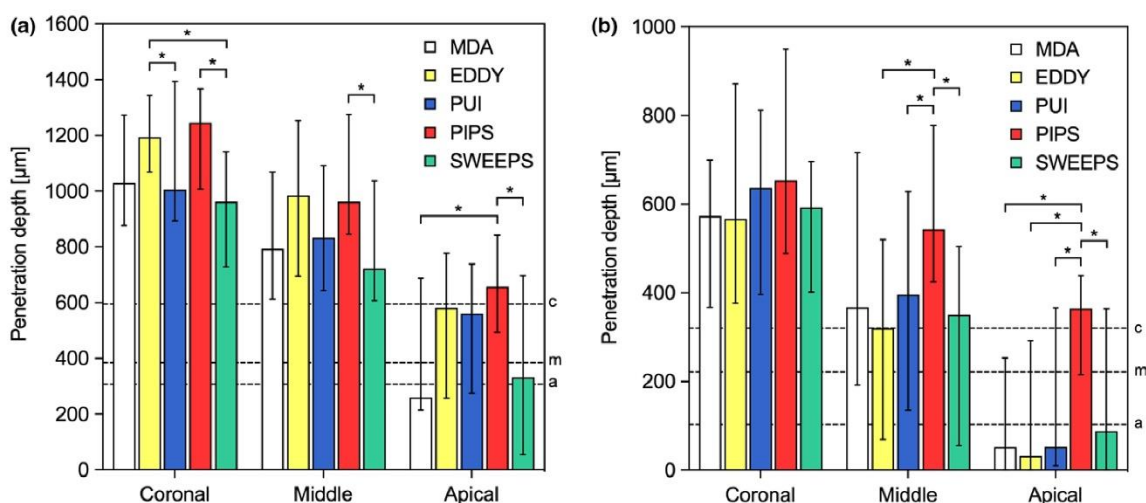


Figure 3 (a) Median penetration depths with 25–75% quantiles for the tested activation methods, depicted separately for coronal, middle and apical sections. (b) Minimally achievable penetration depths with 25–75% quantiles. The dotted line indicates the median (a) and minimum (b) penetration depth for controls; coronal (c), middle (m) and apical (a) level. Asterisks indicate significant differences ($P \leq 0.05$) between groups.

remove smear layer from the canal walls (Teixeira *et al.* 2005). The smaller but still measurable ingress of irrigant in the controls might be explained by the large preparation size of the canals in combination with thorough irrigation; it appears that the smear layer reduces but not fully prevents influx of liquid into the tubules. Furthermore, due to the limited age range of the patients from which the teeth were

collected, sclerotic dentine or limited penetration depths due to other physiological or pathological changes were not expected. Differences between the test groups were negligible in coronal and middle sections, where manual dynamic activation achieved similar results compared to sonic, ultrasonic and laser activation with PIPS and SWEEPS. However, differences become obvious in apical sections. Since

ramifications and lateral canals are frequently present in apical areas (Vertucci 1984), their cleaning is more important for successful treatment. Penetration depths after manual dynamic activation were as low as the controls, but markedly greater with PIPS, EDDY and PUI. Thus, activation of irrigants appears to be beneficial especially in the apical area, where the transportation of irrigants into the dentinal tubules is impeded not only by anatomical conditions such as reduced number of tubules with smaller diameters and sclerotic dentine (Carrigan *et al.* 1984), but also by accessibility. In that respect, PIPS might be advantageous, as it does not depend on the insertion depth of a file or probe, such as with other agitation techniques tested in this study.

Interestingly, the minimum penetration depths per section were significantly greater for PIPS compared to all other tested methods. Regarding the fact that in histological studies, the median penetration depth of bacteria into dentinal tubules reaches 390 μm (Kakoli *et al.* 2009), this increased penetration depth and antibacterial effect inside the dentinal tubules might be clinically relevant. Increased penetration after activation in apical sections might also be due to a reduction or elimination of an apical vapour lock, which impedes irrigant penetration to working length and can be managed better after sonic and ultrasonic activation compared to manual dynamic agitation (Agarwal *et al.* 2017). On the other hand, this study revealed that the new SWEEPS mode was not able to achieve increased penetration depths compared to the other activation methods, but appeared inferior in apical sections, especially regarding minimally achievable values. Thus, the introduction of a modified laser pulse did not lead to enhanced performance. One can speculate that the change in pulse and the generation of secondary bubbles, given the geometrical constraints inside the root canal, might induce counter currents which actually hinder irrigant flow. It also seems that the SWEEPS mode was brought onto the market without thorough testing and comparison to PIPS. Since there is no data on SWEEPS in the literature, these results cannot be related to other findings.

Some of the results observed in this study are co-determined by the experimental design. The teeth that were chosen for the experiments were single-rooted teeth with relatively round canals and simple canal geometry. The benefit of this choice is comparability and reproducibility of penetration depth in different teeth due to the similar root canal anatomies. Presumably, the differences between groups will be more

evident in more complex root canal systems. The canal preparation to a size 40, .06 taper was selected to enable easy penetration of the irrigants and might be considered a medium to large preparation (de Gregorio *et al.* 2013). The irrigation protocol prior to the rinse with EDTA and activation of NaOCl was thorough considering volume, concentration and fluid temperature. Both higher concentration as well as pre-heating of sodium hypochlorite have been shown to increase the efficacy of disinfection as well as tissue dissolution (Sirtes *et al.* 2005). The use of EDTA, a chelator which binds calcium, to remove the smear layer and the subsequent rinse with sodium hypochlorite, which will now penetrate more easily into the dentinal tubules, has been advocated (Sen *et al.* 1995, Violich & Chandler 2010). These factors likely contributed to the large penetration depths in controls as well as in test groups in coronal and middle sections. In the present experiments, methylene blue was used to display penetration depths as an indirect indicator for the ingress of sodium hypochlorite. Various designs for this type of study can be found, where fluorescently labelled irrigants (Akçay *et al.* 2017) or sealers (Chaudhry *et al.* 2017, Uzunoglu-Özyürek *et al.* 2017, Bharti *et al.* 2018) have been used in combination with confocal microscopy. Pilot experiments with fluorescent dyes and methylene blue exhibited advantages for the latter, as dentine shows intense autofluorescence. Penetration depths of methylene blue observed in this study are in line with other findings; comparable studies of sealer penetration after irrigation show similar penetration depths into dentine as well as significantly superior sealer penetration at greater distances from the apex (Akçay *et al.* 2017, Chaudhry *et al.* 2017, Uzunoglu-Özyürek *et al.* 2017, Bharti *et al.* 2018). In order to exclude errors during the analysis of penetration depths, the same two examiners performed this task together. Whereas one examiner determined the start and end-point of each line segment, the second examiner verified the correct procedure. The actual measurement of line segments was based on software.

Conclusion

Thorough irrigation of straight, large canals in extracted teeth with simple root canal geometries enabled penetration in coronal and middle sections but faced limitations in apical areas. Activation of irrigants increased penetration depths apically, where PIPS was associated with segments of deeper

penetration, followed by EDDY and PUI. SWEEPS, on the other hand, did not show benefits compared even to manual dynamic activation.

Conflict of interest

The authors have stated explicitly that there are no conflicts of interest in connection with this article.

References

- Agarwal A, Deore RB, Rudagi K *et al.* (2017) Evaluation of apical vapor lock formation and comparative evaluation of its elimination using three different techniques: an in vitro study. *Journal of Contemporary Dental Practice* **18**, 790–4.
- Akçay M, Arslan H, Mese M *et al.* (2017) Effect of photon-initiated photoacoustic streaming, passive ultrasonic, and sonic irrigation techniques on dentinal tubule penetration of irrigation solution: a confocal microscopic study. *Clinical Oral Investigations* **21**, 2205–12.
- Bharti R, Tikku AP, Chandra A, Shakya VK, Yadav S. (2018) Depth and percentage of resin-based sealer penetration inside the dentinal tubules using EndoVac, EndoActivator, Navi tip FX irrigation system: a confocal laser scanning microscope study. *Journal of Conservative Dentistry* **21**, 216–20.
- Blanken J, De Moor RJ, Meire M *et al.* (2009) Laser induced explosive vapor and cavitation resulting in effective irrigation of the root canal. Part 1: a visualization study. *Lasers in Surgery and Medicine* **41**, 514–9.
- Bryce G, MacBeth N, Gulabivala K *et al.* (2018) The efficacy of supplementary sonic irrigation using the EndoActivator® system determined by removal of a collagen film from an ex vivo model. *International Endodontic Journal* **51**, 489–97.
- Carrigan PJ, Morse DR, Furst ML *et al.* (1984) A scanning electron microscopic evaluation of human dentinal tubules according to age and location. *Journal of Endodontics* **10**, 359–63.
- Chaudhry S, Yadav S, Talwar S *et al.* (2017) Effect of EndoActivator and Er, Cr:YSGG laser activation of Qmix, as final endodontic irrigant, on sealer penetration: a confocal microscopic study. *Journal of Clinical and Experimental Dentistry* **9**, e218–22.
- De Moor RJ, Meire M, Goharkhay K *et al.* (2010) Efficacy of ultrasonic versus laser-activated irrigation to remove artificially placed dentin debris plugs. *Journal of Endodontics* **36**, 1580–3.
- Deleu E, Meire MA, De Moor RJ (2015) Efficacy of laser-based irrigant activation methods in removing debris from simulated root canal irregularities. *Lasers in Medical Science* **30**, 831–5.
- Divito E, Peters OA, Olivi G (2012) Effectiveness of the erbium:YAG laser and new design radial and stripped tips in removing the smear layer after root canal instrumentation. *Lasers in Medical Science* **27**, 273–80.
- Foschi F, Nucci C, Montebugnoli L *et al.* (2004) SEM evaluation of canal wall dentine following use of Mtwo and Pro-Taper NiTi rotary instruments. *International Endodontic Journal* **37**, 832–9.
- de Gregorio C, Estevez R, Cisneros R *et al.* (2010) Efficacy of different irrigation and activation systems on the penetration of sodium hypochlorite into simulated lateral canals and up to working length: an in vitro study. *Journal of Endodontics* **36**, 1216–21.
- de Gregorio C, Arias A, Navarrete N *et al.* (2013) Effect of apical size and taper on volume of irrigant delivered at working length with apical negative pressure at different root curvatures. *Journal of Endodontics* **39**, 19–24.
- Guidotti R, Merigo E, Fornaini C *et al.* (2014) Er:YAG 2,940-nm laser fiber in endodontic treatment: a help in removing smear layer. *Lasers in Medical Science* **29**, 69–75.
- Jiang LM, Verhaagen B, Versluis M *et al.* (2011) The influence of the ultrasonic intensity on the cleaning efficacy of passive ultrasonic irrigation. *Journal of Endodontics* **37**, 688–92.
- Kakoli P, Nandakumar R, Romberg E *et al.* (2009) The effect of age on bacterial penetration of radicular dentin. *Journal of Endodontics* **35**, 78–81.
- Matsumoto H, Yoshimine Y, Akamine A (2011) Visualization of irrigant flow and cavitation induced by Er:YAG laser within a root canal model. *Journal of Endodontics* **37**, 839–43.
- Paqué F, Balmer M, Attin T *et al.* (2010) Preparation of oval-shaped root canals in mandibular molars using nickel-titanium rotary instruments: a micro-computed tomography study. *Journal of Endodontics* **36**, 703–7.
- Peters OA, Schonenberger K, Laib A (2001) Effects of four Ni-Ti preparation techniques on root canal geometry assessed by microcomputed tomography. *International Endodontic Journal* **34**, 221–30.
- Ram Z (1977) Effectiveness of root canal irrigation. *Oral Surgery Oral Medicine Oral Pathology Oral Radiology and Endodontology* **44**, 306–12.
- Rödig T, Bozkurt M, Konietzschke F *et al.* (2010) Comparison of the Vibringe system with syringe and passive ultrasonic irrigation in removing debris from simulated root canal irregularities. *Journal of Endodontics* **36**, 1410–3.
- Schindelin J, Arganda-Carreras I, Frise E *et al.* (2012) Fiji: an open-source platform for biological-image analysis. *Nature Methods* **9**, 676–82.
- Sen BH, Wesselink PR, Türkün M (1995) The smear layer: a phenomenon in root canal therapy. *International Endodontic Journal* **28**, 141–8.
- Sirtes G, Waltimo T, Schaetzle M, Zehnder M (2005) The effects of temperature on sodium hypochlorite short-term stability, pulp dissolution capacity, and antimicrobial efficacy. *Journal of Endodontics* **31**, 669–71.
- Teixeira CS, Felipe MC, Felipe WT (2005) The effect of application time of EDTA and NaOCl on intracanal smear

- layer removal: an SEM analysis. *International Endodontic Journal* **38**, 285–90.
- Uzunoglu-Özyürek E, Karaaslan H, Türker SA *et al.* (2017) Influence of size and insertion depth of irrigation needle on debris extrusion and sealer penetration. *Restorative Dentistry and Endodontics* **43**, e2.
- Verstraeten J, Jacquet W, De Moor RJG *et al.* (2017) Hard tissue debris removal from the mesial root canal system of mandibular molars with ultrasonically and laser-activated irrigation: a micro-computed tomography study. *Lasers in Medical Science* **32**, 1965–70.
- Vertucci FJ (1984) Root canal anatomy of the human permanent teeth. *Oral Surgery Oral Medicine Oral Pathology Oral Radiology and Endodontology* **58**, 589–99.
- Violich DR, Chandler NP (2010) The smear layer in endodontics—a review. *International Endodontic Journal* **43**, 2–15.
- Widbiller M, Eidt A, Hiller K-A, Buchalla W, Schmalz G, Galler KM (2017) Ultrasonic activation of irrigants increases growth factor release from human dentine. *Clinical Oral Investigations* **21**, 879–88.
- Zehnder M (2006) Root canal irrigants. *Journal of Endodontics* **32**, 389–98.

4 Ausblick

Das Studiendesign schloss aus Gründen der Reproduzierbarkeit und Vergleichbarkeit nur einwurzelige Zähne mit einfacher Kanalgeometrie und rundem Kanaldurchmesser in die Untersuchung ein. Zwischen den Testgruppen konnten wahrscheinlich deshalb in den koronalen und mittleren Kanaldritteln nur geringe Unterschiede bezüglich der Eindringtiefe der Spülflüssigkeiten festgestellt werden. In den apikalen Wurzeldritteln, in welchen vermehrt Ramifikationen und Seitenkanälchen vorkommen, waren jedoch Unterschiede bezüglich der Effizienz der verschiedenen Aktivierungsmethoden zu erkennen. Vor allem PIPS führte hier zu tieferem Eindringen in die Dentintubuli, gefolgt von EDDY (Schall) und PUI (Ultraschall). Vermutlich würden sich diese Unterschiede an Zähnen mit komplexeren Wurzelkanalsystemen deutlicher zeigen.

Ein weiterer Vorteil des PIPS könnte darin liegen, dass es lediglich die Einführung des Aufsatzes in die Pulpenkammer erfordert. Andere Aktivierungsmethoden sind von der Qualität der mechanischen Aufbereitung des Wurzelkanals abhängig, um deren Aufsätze bis auf Arbeitslänge einführen zu können. Die Präparation des Wurzelkanals stellt bei Zähnen mit Isthmen, gekrümmten und obliterierten Kanälen eine Herausforderung für den Behandler dar. Hier könnte die laserbasierte Aktivierung anderen Methoden überlegen sein.

Es wäre also von Interesse, weitere Versuche mit Zähnen komplexerer Wurzelkanalanatomie durchzuführen. Hierfür würden sich z. B. mesiale Wurzeln von Unterkiefermolaren anbieten, die häufig Isthmen, Krümmungen und akzessorische Kanäle aufweisen (32).

Mikro-Computertomografie-Analysen (μ -CT) haben sich bei Untersuchungen im Bereich der Endodontie bewährt (1, 33–35), da diese einen dreidimensionalen Einblick in das Innere des Wurzelkanalsystems bieten und selbst bei komplexer Kanalgeometrie Aufschluss über deren Konfiguration geben können, ohne dabei die Probe zu zerstören. Die damit mögliche detaillierte Darstellung mit einem Auflösungsvermögen von nur wenigen Mikrometern erlaubt zudem eine quantitative Beurteilung der Reinigungswirkung durch die endodontische Behandlung. So wäre es durch weitere Versuche möglich, einen qualitativen Vergleich zwischen verschiedenen Aktivierungssystemen zu ziehen und deren Unterschiede hinsichtlich der Reinigungswirkung in Schnittbildern sowie durch 3D-Rekonstruktionen darzustellen (36). Dabei könnte die Auswirkung der verschiedenen Schritte innerhalb einer endodontischen Behandlung durch Scans im Ausgangszustand der Zähne, nach der

manuellen und maschinellen Aufbereitung der Wurzelkanäle sowie nach der Abschlussspülung mit Aktivierung abgebildet werden. Die gewebsauflösende Wirkung von NaOCl in Kombination mit der jeweiligen Aktivierungsmethode könnte hinsichtlich der Entfernung von Debris beurteilt werden, welcher während der Aufbereitung entsteht und sich in Isthmen und Seitenkanälen ansammelt. Bei jedem Scan kann das exakte Volumen des gesamten Wurzelkanals mittels einer Software erhoben werden. Die Volumenzunahme des Wurzelkanalsystems nach der Abschlussspülung mit Aktivierung sollte höher sein als direkt nach der mechanischen Erweiterung mit standardisierter Spülung ohne Aktivierung und im Vergleich zu einer Kontrollgruppe, bei der die Abschlussspülung ohne Aktivierung erfolgt. Durch die Entfernung des Debris könnte so der Wert der Aktivierungsverfahren dargestellt werden.

Versuche an Zähnen mit komplexeren Wurzelkanalsystemen und deren Untersuchung mittels μ -CT könnten Fragestellungen, die sich durch diese Studie ergeben haben, beantworten und weitere Ergebnisse zur Wirkweise von laserbasierten Aktivierungsmethoden und deren Beitrag zum Erfolg von endodontischen Behandlungen liefern.

5 Literatur

1. Peters OA, Schönenberger K, Laib A. Effects of four Ni-Ti preparation techniques on root canal geometry assessed by micro computed tomography. *Int Endod J* 2001; 34(3):221–30.
2. Paqué F, Balmer M, Attin T, Peters OA. Preparation of oval-shaped root canals in mandibular molars using nickel-titanium rotary instruments: a micro-computed tomography study. *J Endod* 2010; 36(4):703–7. doi: 10.1016/j.joen.2009.12.020.
3. Zehnder M. Root canal irrigants. *J Endod* 2006; 32(5):389–98. doi: 10.1016/j.joen.2005.09.014.
4. Vertucci FJ. Root canal anatomy of the human permanent teeth. *Oral Surgery, Oral Medicine, Oral Pathology* 1984; 58(5):589–99. doi: 10.1016/0030-4220(84)90085-9.
5. Foschi F, Nucci C, Montebugnoli L, Marchionni S, Breschi L, Malagnino VA et al. SEM evaluation of canal wall dentine following use of Mtwo and ProTaper NiTi rotary instruments. *Int Endod J* 2004; 37(12):832–9. doi: 10.1111/j.1365-2591.2004.00887.x.
6. Ram Z. Effectiveness of root canal irrigation. *Oral Surgery, Oral Medicine, Oral Pathology, Oral Radiology, and Endodontology* 1977:306–12.
7. Jiang L-M, Verhaagen B, Versluis M, Langedijk J, Wesselink P, van der Sluis LWM. The influence of the ultrasonic intensity on the cleaning efficacy of passive ultrasonic irrigation. *J Endod* 2011; 37(5):688–92. doi: 10.1016/j.joen.2011.02.004.
8. Bryce G, MacBeth N, Gulabivala K, Ng Y-L. The efficacy of supplementary sonic irrigation using the EndoActivator® system determined by removal of a collagen film from an ex vivo model. *Int Endod J* 2018; 51(4):489–97. doi: 10.1111/iej.12870.
9. Gregorio C de, Estevez R, Cisneros R, Paranjpe A, Cohenca N. Efficacy of different irrigation and activation systems on the penetration of sodium hypochlorite into simulated lateral canals and up to working length: an in vitro study. *J Endod* 2010; 36(7):1216–21. doi: 10.1016/j.joen.2010.02.019.
10. Rödiger T, Bozkurt M, Konietzschke F, Hülsmann M. Comparison of the Vibringe system with syringe and passive ultrasonic irrigation in removing debris from simulated root canal irregularities. *J Endod* 2010; 36(8):1410–3. doi: 10.1016/j.joen.2010.04.023.
11. Blanken J, Moor RJG de, Meire M, Verdaasdonk R. Laser induced explosive vapor and cavitation resulting in effective irrigation of the root canal. Part 1: a visualization study. *Lasers Surg Med* 2009; 41(7):514–9. doi: 10.1002/lsm.20798.
12. Matsumoto H, Yoshimine Y, Akamine A. Visualization of irrigant flow and cavitation induced by Er:YAG laser within a root canal model. *J Endod* 2011; 37(6):839–43. doi: 10.1016/j.joen.2011.02.035.
13. DiVito E, Peters OA, Olivi G. Effectiveness of the erbium:YAG laser and new design radial and stripped tips in removing the smear layer after root canal instrumentation. *Lasers Med Sci* 2012; 27(2):273–80. doi: 10.1007/s10103-010-0858-x.

14. Verstraeten J, Jacquet W, Moor RJG de, Meire MA. Hard tissue debris removal from the mesial root canal system of mandibular molars with ultrasonically and laser-activated irrigation: a micro-computed tomography study. *Lasers Med Sci* 2017; 32(9):1965–70. doi: 10.1007/s10103-017-2297-4.
15. Moor RJG de, Meire M, Goharkhay K, Moritz A, Vanobbergen J. Efficacy of ultrasonic versus laser-activated irrigation to remove artificially placed dentin debris plugs. *J Endod* 2010; 36(9):1580–3. doi: 10.1016/j.joen.2010.06.007.
16. Guidotti R, Merigo E, Fornaini C, Rocca J-P, Medioni E, Vescovi P. Er:YAG 2,940-nm laser fiber in endodontic treatment: a help in removing smear layer. *Lasers Med Sci* 2014; 29(1):69–75. doi: 10.1007/s10103-012-1217-x.
17. Deleu E, Meire MA, Moor RJG de. Efficacy of laser-based irrigant activation methods in removing debris from simulated root canal irregularities. *Lasers Med Sci* 2015; 30(2):831–5. doi: 10.1007/s10103-013-1442-y.
18. Widbiller M, Eidt A, Hiller K-A, Buchalla W, Schmalz G, Galler KM. Ultrasonic activation of irrigants increases growth factor release from human dentine. *Clin Oral Investig* 2017; 21(3):879–88. doi: 10.1007/s00784-016-1824-1.
19. Schindelin J, Arganda-Carreras I, Frise E, Kaynig V, Longair M, Pietzsch T et al. Fiji: an open-source platform for biological-image analysis. *Nat Methods* 2012; 9(7):676–82. doi: 10.1038/nmeth.2019.
20. Teixeira CS, Felipe MCS, Felipe WT. The effect of application time of EDTA and NaOCl on intracanal smear layer removal: an SEM analysis. *Int Endod J* 2005; 38(5):285–90. doi: 10.1111/j.1365-2591.2005.00930.x.
21. Carrigan PJ, Morse DR, Furst ML, Sinai IH. A scanning electron microscopic evaluation of human dentinal tubules according to age and location. *J Endod* 1984; 10(8):359–63. doi: 10.1016/S0099-2399(84)80155-7.
22. Kakoli P, Nandakumar R, Romberg E, Arola D, Fouad AF. The effect of age on bacterial penetration of radicular dentin. *J Endod* 2009; 35(1):78–81. doi: 10.1016/j.joen.2008.10.004.
23. Agarwal A, Deore RB, Rudagi K, Nanda Z, Baig MO, Fareez MA. Evaluation of Apical Vapor Lock Formation and comparative Evaluation of its Elimination using Three different Techniques: An in vitro Study. *J Contemp Dent Pract* 2017; 18(9):790–4.
24. Gregorio C de, Arias A, Navarrete N, Del Rio V, Oltra E, Cohenca N. Effect of apical size and taper on volume of irrigant delivered at working length with apical negative pressure at different root curvatures. *J Endod* 2013; 39(1):119–24. doi: 10.1016/j.joen.2012.10.008.
25. Sirtes G, Waltimo T, Schaetzle M, Zehnder M. The effects of temperature on sodium hypochlorite short-term stability, pulp dissolution capacity, and antimicrobial efficacy. *J Endod* 2005; 31(9):669–71.
26. Sen BH, Wesselink PR, Türkün M. The smear layer: a phenomenon in root canal therapy. *Int Endod J* 1995; 28(3):141–8.

27. Violich DR, Chandler NP. The smear layer in endodontics - a review. *Int Endod J* 2010; 43(1):2–15. doi: 10.1111/j.1365-2591.2009.01627.x.
28. Akcay M, Arslan H, Mese M, Durmus N, Capar ID. Effect of photon-initiated photoacoustic streaming, passive ultrasonic, and sonic irrigation techniques on dentinal tubule penetration of irrigation solution: a confocal microscopic study. *Clin Oral Investig* 2017; 21(7):2205–12. doi: 10.1007/s00784-016-2013-y.
29. Chaudhry S, Yadav S, Talwar S, Verma M. Effect of EndoActivator and Er,Cr:YSGG laser activation of Qmix, as final endodontic irrigant, on sealer penetration: A Confocal microscopic study. *J Clin Exp Dent* 2017; 9(2):e218-e222. doi: 10.4317/jced.53270.
30. Uzunoglu-Özyürek E, Karaaslan H, Türker SA, Özçelik B. Influence of size and insertion depth of irrigation needle on debris extrusion and sealer penetration. *Restor Dent Endod* 2017; 43(1). doi: 10.5395/rde.2018.43.e2.
31. Bharti R, Tikku AP, Chandra A, Shakya VK, Yadav S. Depth and percentage of resin-based sealer penetration inside the dentinal tubules using EndoVac, EndoActivator, Navi tip FX irrigation system: A confocal laser scanning microscope study. *J Conserv Dent* 2018; 21(2):216–20. doi: 10.4103/JCD.JCD_222_17.
32. Tahmasbi M, Jalali P, Nair MK, Barghan S, Nair UP. Prevalence of Middle Mesial Canals and Isthmi in the Mesial Root of Mandibular Molars: An In Vivo Cone-beam Computed Tomographic Study. *J Endod* 2017; 43(7):1080–3. doi: 10.1016/j.joen.2017.02.008.
33. Stavileci M, Hoxha V, Görduysus Ö, Tatar I, Laperre K, Hostens J et al. Evaluation of Root Canal Preparation Using Rotary System and Hand Instruments Assessed by Micro-Computed Tomography. *Med Sci Monit Basic Res* 2015; 21:123–30. doi: 10.12659/MSMBR.893950.
34. Xu K, Wang J, Wang K, Gen N, Li J. Micro-computed tomographic evaluation of the effect of the final apical size prepared by rotary nickel-titanium files on the removal efficacy of hard-tissue debris. *J Int Med Res* 2018; 46(6):2219–29. doi: 10.1177/0300060518757607.
35. Domark JD, Hatton JF, Benison RP, Hildebolt CF. An ex vivo comparison of digital radiography and cone-beam and micro computed tomography in the detection of the number of canals in the mesiobuccal roots of maxillary molars. *J Endod* 2013; 39(7):901–5. doi: 10.1016/j.joen.2013.01.010.
36. Lloyd A, Navarrete G, Marchesan MA, Clement D. Removal of calcium hydroxide from Weine Type II systems using photon-induced photoacoustic streaming, passive ultrasonic, and needle irrigation: a microcomputed tomography study. *J Appl Oral Sci* 2016; 24(6):543–8. doi: 10.1590/1678-775720160234.

6 Danksagung

Zuallererst möchte ich mich ganz herzlich bei Frau Prof. Dr. Kerstin Galler für die Überlassung dieses interessanten Themas und die hervorragende Betreuung bedanken. Zudem möchte ich ihr dafür danken, dass ich das Thema auf der 50. Jahrestagung der AfG in der DGZMK in Mainz vorstellen durfte sowie für die Ermöglichung einer Promotionspublikation. Ein weiterer großer Dank gilt Herrn Dr. Matthias Widbiller für die großartige Betreuung selbst aus dem Ausland sowie für die finale statistische Auswertung der Daten und die Erstellung der Graphen.

Des Weiteren möchte ich mich bei Herrn Dr. Ralph Schlichting für die Unterstützung bei der Versuchsdurchführung mit dem FOTONA-Laser und die Bereitstellung des Lasergerätes bedanken. Ein weiterer Dank gilt Herrn Dr. Karl-Anton Hiller für die vorläufige statistische Auswertung der Daten und die Erstellung der Graphen für die Postervorstellung auf der Jahrestagung der AfG in der DGZMK in Mainz.

Ganz besonders möchte ich mich außerdem bei Andreas Rosendahl und Melanie Wölflick für die großartige Betreuung bei der Laborarbeit bedanken und dafür, dass sie stets als erste Ansprechpartner für mich da waren. Mein ganz herzlicher Dank gilt außerdem meinen Doktoranden-Kolleginnen Christine Witzani und Lisa Scheidtmann für die wunderbare Zusammenarbeit und ihren Teamgeist.

Abschließend möchte ich mich von ganzem Herzen bei meiner Familie insbesondere bei meinen Eltern bedanken, die mir jederzeit unterstützend zur Seite stehen und mir damit das Zahnmedizinstudium sowie die Erstellung dieser Arbeit ermöglicht haben.

Verena Grubmüller, September 2019

